

Применение нечетких графов в функционально-логическом моделировании систем

Е.В. Петрунина

МГТУ, 107150, ул. Лосиноостровская, 49, Москва, Россия

Аннотация

Рассмотрен процесс функционально-логического моделирования сложных техногенных комплексов с учетом неопределенностей. Проведен анализ характерных типов случайных факторов, влияющих на процессы функционирования агрегатов и устройств, входящих в состав гетерогенных систем. С целью адекватного отображения схем алгоритмов логического управления, а также гибкости создания и анализа моделей систем предложено обобщение и развитие методов нечеткого моделирования на основе функциональных нечетких графов. Произведена реализация функционального нечеткого графа, которая позволяет провести анализ поведения и качества начальной имитационной модели. Предложенный метод реализован на примере одного из модулей алгоритма логического управления криогенной системы заправки космических транспортных средств.

Ключевые слова: функционально-логическое моделирование; нечеткий граф; алгоритм логического моделирования; параллельный алгоритм

1. Введение

Функционально-логическое моделирование (ФЛМ) представляет собой актуальное направление в разработке моделей предметных областей с большим числом причинно-следственных отношений между объектами, к которым относятся гетерогенные системы. Подобные модели типичны для систем имитационного моделирования сложных техногенных комплексов [1,2], когда решение принимается с использованием длинных последовательностей логических правил и большого количества функциональных моделей отдельных технологических элементов и агрегатов. Логическое моделирование заменяет программирование в обычном смысле на декларативное описание предметной области с последующей формулировкой задачи в терминах, близких к содержательным [3,4]. Затем решение ищется автоматически с использованием формальных логических преобразований. Тем самым исключаются такие этапы решения задач, как алгоритмизация, программирование и отладка программ.

2. Постановка задачи

Функционально-логическое моделирование связано с применением формальных языков, учитывающих при записи статистические и физико-химические процессы в моделируемых объектах.

При эксплуатации сложных техногенных комплексов возникают различного вида неопределенности – случайность (или стохастическая неопределенность), нечеткость, неточность и разнообразные их комбинации [5,6]. Соответственно в процессе моделирования необходимо предусмотреть методы работы с ними. Для решения подобных задач привлекаются средства как традиционного характера (статистические алгоритмы, имитационное моделирование, оптимизационные алгоритмы), так и современные методы (искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы и т.д.).

В техногенных комплексах можно выделить следующие типы случайностей и неопределенностей, влияющих на процессы функционирования агрегатов и устройств:

- случайные изменения внешних воздействий (флуктуации таких физических параметров, как температура, давление, влажность и т.п.);
- случайные изменения параметров и характеристик отдельных функциональных элементов;
- случайные изменения функциональных причинно-следственных связей в процессе функционирования комплекса;
- неопределенный характер некоторых функциональных процессов в агрегатах и устройствах СТЭС («эффект форточки»);
- вероятностные и неопределенные физические и психологические состояния операторов систем заправки.

Кроме того неопределенность обусловлена следующими факторами:

- различной скоростью протекания во времени вероятностных технологических процессов производства и реактивностью самого процесса в смысле управления его реализацией;
- иерархической характеристикой уровней организации и вероятностным характером управления каждым из этих уровней;
- наличием оборудования, характеризующегося высокой степенью надежности, а также требованиями к точным пороговым значениям наработки отдельных компонентов, для которых превышение этого порога неминуемо приводит к отказу функционирования оборудования.

3. Использование нечетких графов в функционально-логическом моделировании

Алгоритм логического управления (принятия управляющего решения) в общем случае можно задать системой уравнений вида [3, 4, 5]:

$$Y = f(X, P), P = \varphi(X, P), X = \gamma(Y, F), X'' \equiv Y'' \equiv P$$

где $X = \{x_i\}$ – множество входных переменных программного автомата (ПА);

$Y = \{y_i\}$ – множество выходных переменных ПА;

$P = \{p_i\}$ – множество промежуточных переменных ПА;

$F = \{f_i\}$ – множество физических переменных, характеризующих условия функционирования технологической системы (температура, давление, перемещение и т.д.).

Последнее уравнение отождествляет подмножества входных, промежуточных и выходных состояний (переменных) для реализации блочного подхода при асинхронных параллельных условиях работы.

При модульной структуре ТК в записи уравнений для малых блоков появляется необходимость введения дополнительных подмножеств входных и выходных переменных:

$R = \{r_i\}$ – подмножество входов в блок от других блоков системы;

$G = \{g_i\}$ – подмножество выходов из блока в другие блоки системы;

$S = \{s_i\}$ – подмножество входов команд или сигналов, приходящих от других систем;

$O = \{o_i\}$ – подмножество реакций или действий оператора с пульта управления.

В записи уравнений функционирования исполнительных механизмов, датчиков, реле времени можно использовать временные, ждущие и ждуще-временные условия, используемые в теории конечных автоматов для записи асинхронной работы.

В большинстве практических технологий для наглядного графического представления алгоритмов управления использует граф-схемы, в которых отражаются вершины слияния параллельных ветвей (И) и вершины слияния альтернативных ветвей (ИЛИ).

В качестве основы для проверки правильности функционирования параллельных алгоритмов логического управления (АЛУ) в условиях случайным образом меняющихся внешних воздействий предлагается применить теорию вероятностных и нечетких функциональных графов (или гиперграфов).

Аналогично подходу, принятому в неопределенном программировании [5], для функционально-логического моделирования АЛУ вводятся понятия нечетких и вероятностных графов (гиперграфов) с многократными неопределенностями [8].

Для адекватного формального отображения таких схем предлагается воспользоваться моделью в виде функционального нечеткого графа (в дальнейшем F-графа) [9]:

$$F = \{V, R\}$$

где V и R – множества функциональных вершин и функциональных ребер.

Для графа справедливы следующие уравнения

$$V = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4 \cup V_5 \cup V_6, \quad a \quad R = R_1 \cup R_2,$$

где V_1 – подмножество вершин, интерпретирующих воздействия окружающей среды на систему;

V_2 – подмножество вершин, интерпретирующих воздействия системы на среду;

V_3 – подмножество вершин, интерпретирующих изменяющиеся физико-химические параметры;

V_4 – подмножество вершин, интерпретирующих сигналы от датчиков элементов (ОЭ);

V_5 – подмножество вершин, интерпретирующих химические вещества, потребляемые системой из окружающей среды;

V_6 – подмножество вершин, интерпретирующих химические вещества, выделяемые системой в окружающую среду.

Множество гиперребер R состоит из следующих подмножеств:

R_1 – подмножество гиперребер, интерпретирующих физико-химические процессы в ОЭ;

R_2 – подмножество гиперребер, интерпретирующих локальные логические алгоритмы управления подмножествами ОЭ.

Статистические параметры и характеристики функционирования отдельных технологических звеньев в рассматриваемых моделях учитываются в основных свойствах нечетких и вероятностных графов и гиперграфов, определяемых ниже следующим образом.

Нечеткие гиперграфы F_g -*графы* определяются как нечеткие бинарные отношения, заданные на множестве гипервершин $F_{gv} = \{V, R, \mu_{ij}\}$, где V и R – множества функциональных вершин и функциональных ребер (или гиперребер), соответственно, для которых на множествах V_i вершин задается функция μ_{ij} . Морфизмы $\mu_{ij}: A \rightarrow B$ – случайные отображения, которые можно интерпретировать как стохастические матрицы [5,7]. Строка матрицы соответствует элементам множества A , а столбцы – элементам из B . Каждый элемент $\mu_{ij}(a,b)$ матрицы есть вещественное число на отрезке $I=[0,1]$, которое можно рассматривать как вероятность того, что вершина $a \in A$ инцидентна вершине $b \in B$. При этом для каждой $a \in A$ должно выполняться естественное условие нормировки $\sum_b \mu_{ij}(a,b) = 1$, означающее, что a инцидентна некоторой вершине b .

В процессе анализа алгоритма определяются достижимые конечные множества выходных переменных в условиях, в которых неопределенность имеет не стохастический или субъективный характер.

В соответствии с введенными обозначениями алгоритм логического управления записывается в форме неопределенного F_g -графа, интерпретирующего композицию операций действия, ожидания и дополнения.

Каждой операции в F_g -графе ставится в соответствие числовая функция, определяющая вероятность соответствующего события или надежность соответствующего отдельного технологического элемента.

Практическую реализацию предложенного метода рассмотрим на примере одного из модулей гетерогенной системы, а именно на одном из модулей алгоритма логического управления криогенной системы заправки транспортных средств. Рассматриваемый модуль алгоритма логического управления включает в себя следующие элементы: AY_i - анализатор условий; "&_i"/"ИЛИ_i" - операции конъюнкции / дизъюнкции; ИМ_i - исполнительные механизмы; o_i - сигналы от операторов системы; g_i - сигналы в другие блоки; i_i - сигналы от других блоков; s_i - сигналы от других систем. Уравнения управления для рассматриваемого модуля записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} p_1 &= o_1 \& r_1 \& r_2 \& r_3; & p_2 &= p_1 + r_4; & p_3 &= o_2 + x_4; \\ p_4 &= y_2 \& x_1; & p_5 &= o_3 \& y_1; & p_6 &= p_4 + p_5; \\ p_7 &= s_1 + s_2; & p_8 &= p_6 \& p_7; & g_3 &= p_4 + p_5; \\ g_4 &= x_3 \& x_4 \& x_5 \& x_7; & y_2 &= p_2 \& p_3; & y_1 &\equiv p_3. \end{aligned}$$

Уравнения функционирования исполнительных механизмов и датчиков:

$$\begin{aligned} x_1 &\equiv y_1(t_{x1} = t_{y1} + \Delta_1 t); & x_3 &\equiv y_3(t_{x3} = t_{p7} + \Delta_3 t); \\ x_4 &\equiv y_4(t_{x4} = t_{p4} + \Delta_4 t); & x_5 &\equiv y_5(t_{x5} = t_{p7} + \Delta_5 t); \\ x_6 &\equiv y_6(t_{x6} = t_{p6} + \Delta_6 t); & x_7 &\equiv y_7(t_{x7} = t_{p7} + \Delta_7 t); \\ g_1 &\equiv y_1(t_{q1} = t_{y1} + \Delta_1 t); & g_2 &\equiv y_2(t_{q2} = t_{y2} + \Delta_2 t). \end{aligned}$$

Функциональный гиперграф, интерпретирующий исходные уравнения приведенного модуля изображен на рис.1.

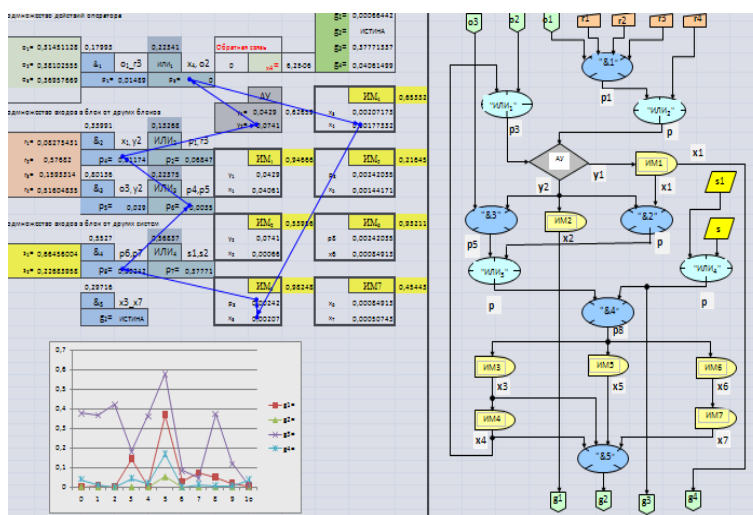


Рис. 1. Функциональный граф блока заправки.

Для рассмотренного блока предлагается рассмотреть сигналы, входящие в блок от других исполнительных механизмов при помощи функций принадлежности $\mu_{ij}(x_i)$, задающих меру уверенности в исправности исполнительных механизмов. Полученный граф можно преобразовать в эквивалентную нечеткую сеть Петри типа C_f (НСП типа C_f), которая получается в результате введения нечеткости в начальную маркировку и правила срабатывания переходов формализма обычных сетей Петри.

Параллельные алгоритмы логического моделирования представляются совокупностью параллельно выполняемых модулей – элементарных алгоритмов, иерархическая структура которых поддерживается путем обмена командами и оповещениями между алгоритмами различных уровней иерархии.

Анализ корректности алгоритма управления, то есть его соответствия заданному по замыслу проектировщика поведению системы, проводится специальным программным комплексом [10] в два этапа:

- синтаксический контроль, при котором обнаруживаются недопустимые сочетания символов в ПРАЛУ-описании;
- моделирование алгоритма, в ходе которого обнаруживаются семантические ошибки, осуществляется исследование работоспособности алгоритма управления в различных режимах работы проектируемого оборудования.

Для осуществления всех указанных проверок разработана специализированная тестовая оболочка [10], отличающаяся возможностью настройки на отдельные технологические звенья различных техногенных комплексов, а также большим количеством корректных типовых алгоритмов управления простейшими узлами, блоками и агрегатам гетерогенных систем. Результаты имитационного моделирования рассмотренного модуля ПРАЛУ (временные характеристики) с различными исходными функциями принадлежности $\mu_{ij}(x_i)$ представлены на рис.2.

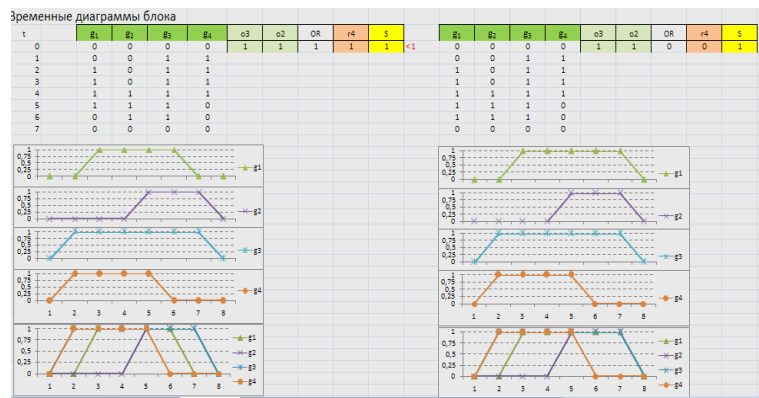


Рис. 2. Функциональный граф блока заправки.

Подобная реализация функционального графа в табличном процессоре Excel позволяет быстро провести экспресс-анализ поведения и качества начальной имитационной модели, а также подготовить исходные данные для получения конечных прикладных моделей в прикладных пакетах систем компьютерной математики различных классов.

4. Заключение

В ходе работы проведен анализ случайных факторов, влияющих на процесс функционирования техногенных комплексов, рассмотрены средства функционально-логического моделирования АЛУ элементов гетерогенных систем. С целью адекватного отображения схем алгоритмов логического управления моделей гетерогенных систем, предложено обобщение и развитие методов нечеткого моделирования на основе функциональных нечетких графов. Предложенный метод реализован на примере одного из модулей АЛУ криогенной системы заправки транспортных средств. Проведенный вычислительный эксперимент алгоритмов моделирования и анализа позволяет сделать вывод, что предлагаемая технология гомоморфных отображений функциональных графов позволяет оптимизировать структуру исследуемого объекта и провести проверку корректности АЛУ.

Литература

- [1] Башмаков, А. И. Интеллектуальные информационные технологии / Башмаков А. И., Башмаков И. А. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 304 с.
- [2] Смогунов, В.В. Динамика гетерогенных структур в 3 т. Т1. Эволюция ракетно-космических гетерогенных структур / Смогунов В.В., Степанов М.И., Соловьева Е. В. и др . Под ред. Смогунова В.В. – Пенза.: Изд-во Пенз. гос. Ун-та, 2001. – 311 с.
- [3] Попов, С.В. Логическое моделирование: Монография/ С.В. Попов. – М.: Тривант, 2006. – 256 с.
- [4] Закревский, А.Д. Логические основы проектирования дискретных устройств / Закревский А.Д., Поттосин Ю.В., Черемисов Л.Д. – М.: Физматлит, 2007. – 588с.
- [5] Бухараев, Р.Г. Основы теории вероятностных автоматов / Бухараев Р.Г.. – М.: Наука, 1985. – 182 с.
- [6] Лю, Б. Теория и практика неопределенного программирования. / Б.Лю: пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 470с.
- [7] Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление./ А. Пегат : пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 798с.
- [8] Соловьева, Е.В. Модели процессов логического управления для обеспечения экологической надежности сложных техногенных комплексов / Соловьева Е.В., Петрунин В.Н., Селенко Б.П., Кошев А.Н. // Measuring and computing devices in technological processes, International scientific-technical magazine. – Khmel'nitsky, 2002. – №1 - С.170 -174.
- [9] Петрунина, Е.В. Функциональные графы в имитационном моделировании сложных систем / Петрунина Е.В.// Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД – 2015» Труды конференции 21-23 окт. 2015г. Москва в 2 т. / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова Рос. Акад. Наук., под общ. Ред. С.Н. Васильева, А.М. Юсупова. – т.2. – М: ИПУ РАН 2015 – 469с. – с.280-284.
- [10] Петрунина, Е.В. Гетерогенная информационно-моделирующая система сложных эргатических комплексов / Петрунина Е.В. // Новые информационные технологии и системы. Сб. научных статей XI Международной научно-технической конференции (г. Пенза 25-27 ноября 2014г.) – Пенза: Изд-во ПГУ, 2014 – 444с. – С.215-219.